

2.4 Modélisation des systèmes photovoltaïques

2.4.1 Définition

La modélisation d'un système est l'outil de base de la simulation d'un système réel ; c'est d'être capable de prédire son comportement. La modélisation nous permet d'analyser l'influence de différents facteurs sur le système modélisé. Le module solaire est modélisé comme une jonction p-n avec des caractéristiques non linéaires pour décrire sa réponse électrique. Pour analyser ces caractéristiques, un modèle mathématique du module solaire est obtenu (provenant) d'équations mathématiques en termes d'entrées et de sorties du module solaire. Cette modélisation est utilisée généralement pour approximer la sortie du module (tension, courant) en fonction des deux entrées qui sont la température et l'éclairement auxquels le module est soumis (fig. 2.9).

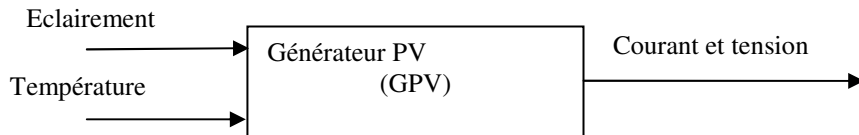


Fig.2.9 : Paramètres d'entrée et sortie du module

2.4.2 Circuit équivalent d'un module

Dans cette étude, on se limite au schéma équivalent d'un module à une seule diode (fig. 2.10) qui est le même que celui d'une cellule solaire PV présenté dans le chapitre un où les résistances Rp et Rs représentent les résistances parallèle et série du module respectivement. Ce schéma équivalent à une seule diode est suffisant pour décrire le comportement des modules dans le fonctionnement normal (éclairement n'est pas faible), ses insuffisances résident aux faibles valeurs d'éclairement où le schéma équivalent à deux diodes est souhaitable.

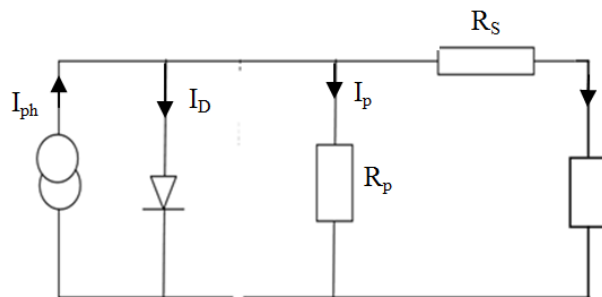


Fig. 2.10 Schéma équivalent d'un module à une seule diode

2.4.3 Modèle électrique I-V d'un module : cas général

2.4.3.1 Présentation du modèle

L'application de la première loi de Kirchhoff, au circuit présenté dans la figure 2.10 (ci-dessus), donne :

$$I = I_{ph} - I_D - I_p \tag{2.1}$$

Avec

$$I_D = I_S \left(e^{\frac{q(U+R_s I)}{aKT}} - 1 \right) \tag{2.2}$$

Et

$$I_p = \frac{U+R_s I}{R_p} \tag{2.3}$$

D'où

$$I = I_{ph} - I_S \left(e^{\frac{q(U+R_s I)}{aKT}} - 1 \right) - \frac{U+R_s I}{R_p} \tag{2.4}$$

Où

I_{ph} est le photocourant (égale au courant de court circuit I_{cc}), I_D courant de la diode, I_s courant de saturation de la diode, K constante de Boltzmann, a facteur d'idéalité de la diode (compris entre 1 et 2), T température absolue en Kelvin, q charge de l'électron, U la tension aux bornes de la cellule, I le courant traversant la charge, R_s la résistance série et R_p la résistance parallèle.

2.4.3.2 Résolution de l'équation

L'équation précédente de la caractéristique $I=f(V)$ est résolue par des méthodes d'itération simple. Généralement la méthode de NEWTON RAPHSON est choisie pour la convergence rapide de la réponse.

Application de la méthode de NEWTON

La méthode de NEWTON est décrite par l'équation suivante :

$$X_{n+1} = X_n - \frac{f(X_n)}{f'(X_n)} \tag{2.5}$$

Où $f'(X_n)$ représente le dérivé de la fonction $f(X_n)$

La réécriture de l'équation 2.4, en négligeant l'effet de la résistance parallèle (résistance supposée très grande), donne la fonction suivant :

$$f(I) = I_{ph} - I - I_0 \left[\exp\left(\frac{q(V+R_s I)}{nkT}\right) - 1 \right] = 0 \tag{2.6}$$

L'application de la méthode de NEWTON RAPHSON donne l'équation récursive suivante, le courant de sortie I est calculé itérativement.

$$I_{n+1} = I_n - \frac{I_{ph} - I_n - I_0 \left[\exp\left(\frac{q(V+R_s I_n)}{nkT}\right) - 1 \right]}{-1 - \left(\frac{q}{nkT}\right) R_s I_0 \exp\left(\frac{q(V+R_s I_n)}{nkT}\right)} \tag{2.7}$$

2.4.4 Modèle électrique d'un module : cas simplifié

2.4.4.1 Présentation du modèle I-V de référence

La détermination des paramètres du circuit équivalent dépend des hypothèses simplificatrices faites et du modèle utilisé. Le modèle le plus simple est le modèle dite à quatre paramètres donnés par les constructeurs des modules à savoir le courant de court circuit (I_{sc}), la tension de circuit ouvert (V_{oc}), la tension (V_{mp}) et le courant (I_{mp}) au point de puissance maximale.

L'équation I-V, dans les conditions de test standard, est donnée par :

$$I_{ref} = I_{sc} \left\{ 1 - C_1 \left[\exp\left(\frac{V_{ref}}{C_2 V_{oc}}\right) - 1 \right] \right\} \tag{2.8}$$

avec

$$C_1 = \left(1 - \frac{I_{mp}}{I_{sc}} \right) e^{\left(\frac{-V_{mp}}{C_2 V_{oc}}\right)} \tag{2.9a}$$

Et

$$C_2 = \frac{V_{mp} - 1}{\ln\left(1 - \frac{I_{mp}}{I_{sc}}\right)} \tag{2.9b}$$

La figure 2.11 montre les caractéristiques I-V et P-V d'un module dont les caractéristiques sous conditions STC sont données dans le tableau 2.1.

Tableau 2.1 Caractéristiques d'un module

| Type du module | Polycrystallin |
|---|-------------------------------|
| Courant de court circuit (I_{sc}) | 2.41 A |
| Circuit ouvert (V_{oc}) | 22.4 V |
| Courant Optimal (I_{mp}) | 2.2 A |
| Tension optimale (V_{mp}) | 17.45 V |
| Coefficient de température de courant de court circuit (α_T) | $\alpha_T = 0.06\%/^{\circ}C$ |
| Coefficient de température de tension de circuit ouvert (β_T) | $\beta_T = -0.4\%/^{\circ}C$ |
| Resistance série (estimée) : R_s | 0.7 Ω |

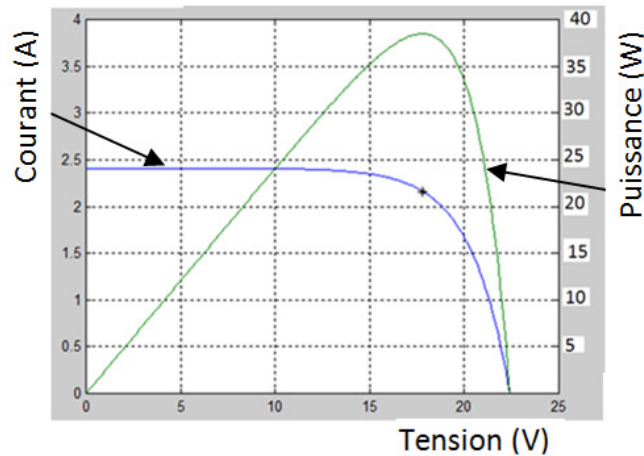


Fig. 2.11 Caractéristiques I-V et P-V d'un module

2.4.4.2 Extension du modèle électrique

Pour d'autres niveaux d'éclairement (G) et de température (T), le courant et la tension du module changent de valeurs (ils deviennent I_{new} et V_{new}). L'équation précédente (équation 2.8) peut être adaptée à ces nouvelles valeurs comme suit :

$$I_{new} = I_{ref} + \Delta I \tag{2.11}$$

$$V_{new} = V_{ref} + \Delta V \tag{2.12}$$

Avec

$$\Delta I = \alpha_T \left(\frac{G}{G_{ref}} \right) \Delta T + \left(\frac{G}{G_{ref}} - 1 \right) I_{ref} \tag{2.13}$$

$$\Delta V = \beta_T \cdot \Delta T + R_s \Delta I \tag{2.14}$$

$$\Delta T = T - T_{ref} \tag{2.15}$$

Où

α_T et β_T sont les coefficients de la température du courant et de la tension respectivement.

La figure 2.12 montre les caractéristiques du module précédent pour différentes valeurs de l'éclairement à température constante.

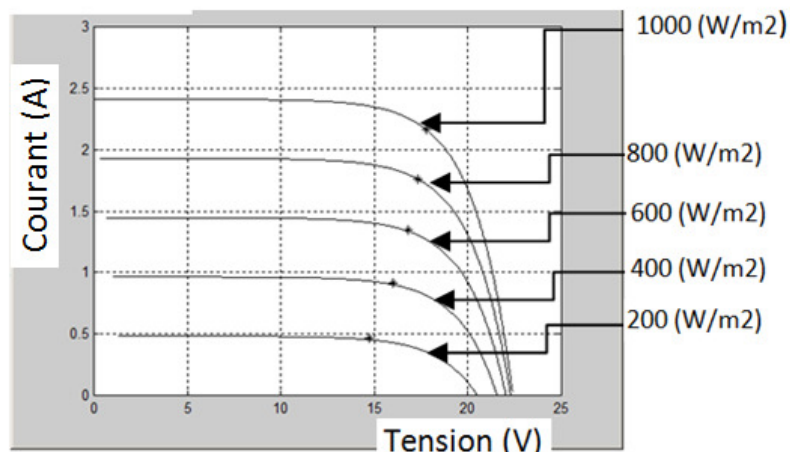


Fig. 2.12 Caractéristiques I-V pour différentes valeurs de l'éclairement à température constante

La figure 2.13 montre les caractéristiques du module précédent pour différentes valeurs de la température à éclairement constant.

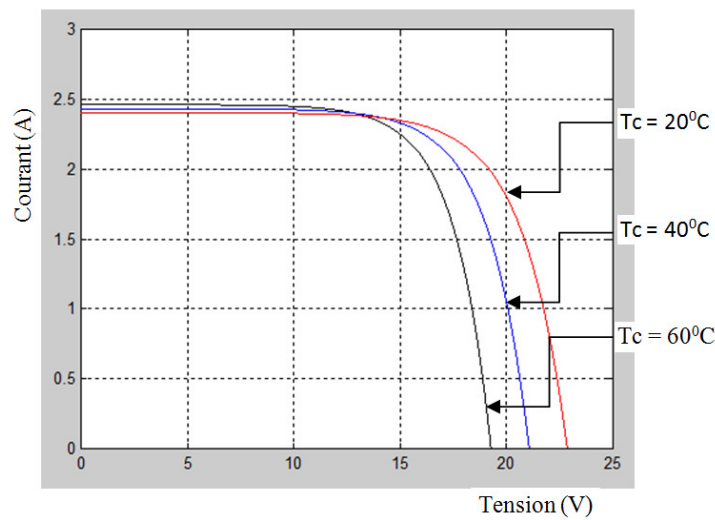


Fig. 2.13 Caractéristiques du module précédent pour différentes valeurs de la température à éclairement constant

La figure 2.14 montre les caractéristiques du module précédent pour différentes valeurs de la température et éclairement.

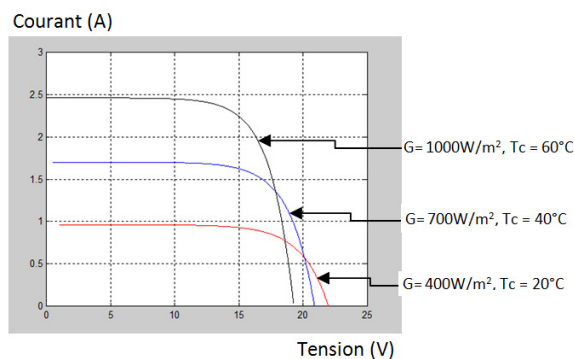


Fig. 2.14 Caractéristiques du module précédent pour différentes valeurs de la température et de l'éclairage

2.4.5 Modélisation de la température du module

La relation entre la température de la cellule et la température ambiante est donnée par l'équation 2.16.

$$T_c = T_a + G \times \frac{NOCT-20}{0.8} \tag{2.16}$$

Où

Ta est la température ambiante, G l'éclairement (kW/m²), NOCT la température nominale de fonctionnement pour une température ambiante de 20°C et éclairage de 0.8kW/m² et pour une vitesse du vent de 1m/s.

N.B.

- Cette température est considérée aussi comme température du module.
- NOCT peut varier d'une zone à une autre.

- La mesure de la température moyenne de la cellule est, en général, prise sur le dos intérieur du module et la température ambiante à l'ombre.

2.4.6 Rendement du module

A) Expression

Le rendement du module est donné par l'équation 2.17.

$$\tau_m = \frac{FF \times I_{sc} \times V_{co}}{S_m \times E_c} \tag{2.17}$$

Où

FF est le facteur de forme, I_{sc} le courant de court circuit, V_{co} la tension de circuit ouvert, S_m la surface effective du module et E_c l'éclairement incident sur la surface du module.

B) Effet de la température

La température a un effet néfaste sur le rendement du module. Son expression en fonction de la température est :

$$\tau_m = \tau_{mo} [1 - \beta_0 (T_C - 25)] \tag{2.18}$$

Avec

τ_{mo} est le rendement du module dans les conditions de test standard, β_0 le coefficient défini comme diminution du rendement par unité de température et T_C la température de la cellule.

2.4.7 Modèle électrique I-V d'un générateur PV

2.4.7.1 Caractéristique I-V

Le modèle précédent peut être étendu au générateur photovoltaïque (GPV). Pour un générateur de N_s modules en série et N_p branches en parallèle, la tension aux bornes du générateur et le courant traversant la charge deviennent:

$$V_g = N_s \times V_{new} \tag{2.19}$$

$$I_g = N_p \times I_{new} \tag{2.20}$$

2.4.7.2 Puissance

La puissance est donnée par l'équation suivante :

$$P_g = V_g \times I_g \tag{2.21}$$

La figure 2.15 montre les caractéristiques I-V et P-V sous les conditions de test standard (STC) d'un générateur PV de 10 modules en série sous forme de quatre rangées.

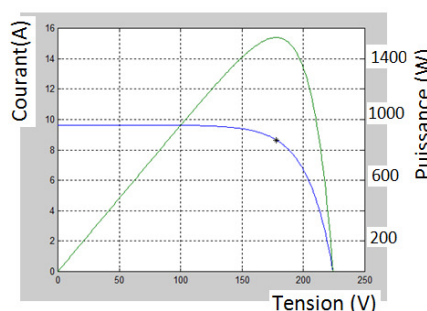


Fig. 2.15 Caractéristiques I-V et P-V sous STC

2.4.8 Effets des résistances série et parallèle sur les caractéristiques du module et générateur PV

Le module ou le générateur PV ne sont que l'image de la cellule solaire PV à grande échelle. Les résistances série et parallèle ont un effet néfaste sur les caractéristiques des modules ou des générateurs PV. Ceci se traduit par une diminution de la puissance fournie.

A) Résistance série

C'est la partie du code de la caractéristique I-V vers la tension de circuit ouvert qui est modifiée. L'effet touche beaucoup plus la tension (voir figure 1.13 du chapitre un).

B) Effet de la résistance shunt

C'est la partie du code de la caractéristique I-V vers le courant de court circuit qui est modifiée. L'effet touche beaucoup plus le courant (voir figure 1.14 du chapitre un)..

Références

- [1] Sylvain Delenclos, Le solaire photovoltaïque, 2016-2017, <http://gte.univ-littoral.fr>
- [2] Cours-Solaire-EPF2010.pdf, partie III : solaire photovoltaïque.
- [3] T. Markvart and L. Castaner, Photovoltaics : Fundamentals and applications, Elsevier Ltd., 2003
- [4] T. Markvart, photovoltaic solar energy conversion, lecture at European summer university : energy for Europe Strasbourg, July 2002.
- [5] T. Khatib and W. Elmenreich, Modeling of photovoltaic systems using MATLAB: Simplified green codes, First edition, John Wiley & Sons, Inc. , 2016.
- [6] G.N. Tiwari, Arvind Tiwari and Shyam, handbook of solar Energy: Theory, Analysis and Applications, Springer science, Singapore, 2016.
- [7] Arno HM Smets, Klaus Jäger, Olindo Isabella, René ACMM van Swaaij, Miro Zeman, Solar energy. The physics and engineering of photovoltaic conversion, technologies and Systems, UIT Cambridge, England, 2016.